

Автор благодарен Р. М. Зайделю за полезные дискуссии и А. Н. Шуйкину за помощь в обработке экспериментальных данных.

Поступила 2 VI 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Минеев В. Н., Лисицын Ю. В., Тюняев Ю. Н., Безруков Г. И. Поляризация щелочно-галлоидных кристаллов при ударном нагружении. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 1.
2. Neilson W. Effect of strong shocks in ferroelectric materials. Bull. Amer Phys. Soc., 1957, vol. 2, No. 6.
3. Reynolds C. E., Seay G. E. Two-wave shock structures in the ferroelectric ceramics barium titanate and lead zirconate titanate. J. Appl. Phys., 1962, vol. 33, No. 7.
4. Lindere R. K. Depolarization of ferroelectrics at high strain rates. J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, No. 12.
5. Doran D. G. Shock wave compression of barium titanate and 95/5 lead zirconate titanate. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 1.
6. Halpin W. J. Current from a shock-loaded shortcircuited ferroelectric ceramic disk. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 1.
7. Halpin W. J. Resistivity estimates for some shocked ferroelectrics. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 8.
8. Глоzman И. А. Пьезокерамические материалы в электронной технике. М.—Л., «Энергия», 1965.
9. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, вып. 2.
10. Дулин И. Н., Альтшулер Л. В., Ващенко В. Я., Зубарев В. Н. Фазовые превращения нитрида бора при динамическом сжатии. Физика твердого тела, 1969, т. 11, вып. 5.
11. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н., Кулешова Л. В., Симмаков Г. В. Исследование галогенидов щелочных металлов при высоких давлениях и температурах ударного сжатия. Физика твердого тела, 1963, т. 5, вып. 1.
12. Зельдович Я. Б. Э.д.с. возникающая при распространении ударной волны по диэлектрику. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 1.
13. Allison F. E. Shock-induced polarization in plastics. 1. Theory. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 7.
14. Иванов А. Г., Лисицын Ю. В., Новицкий Е. З. Задача о поляризации диэлектриков при ударном нагружении. ЖЭТФ, 1968, т. 54, вып. 1.
15. Зайдель Р. М. Определение режима электрической релаксации при ударном нагружении. ЖЭТФ, 1968, т. 54, вып. 4.

#### МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗА ФРОНТОМ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН

*Л. В. Альтшулер, М. Н. Павловский*

(Москва)

Получаемые с помощью ударных волн сведения наиболее точны при изучении однократной сжимаемости веществ, не переходящих при сжатии в другие кристаллические модификации. В упругопластических средах и в веществах, испытывающих фазовые переходы, вместо одной поверхности разрыва формируется последовательность из нескольких ударных волн. Регистрация их параметров во многом уступает по точности и однозначности экспериментальному анализу однократной сжимаемости. Большие затруднения вызывает также изучение релаксирующих сред, по которым ударные волны распространяются с переменной скоростью. Для исследования всех этих сложных явлений существенны прямые методы регистрации плотности вещества, находящегося под воздействием высоких давлений в течение возможно более длительного интервала времени. Представляет интерес, в частности, изучение состояний, возникающих при лоб-

вом столкновении ударных волн «столообразного» профиля. Этим способом достигаются одинаковые во всем объеме образца давления, в несколько раз превышающие давления в падающих волнах. Среда при столкновении испытывает «двухступенчатое» нагружение, вызывающее по сравнению с однократным меньшее увеличение энтропии.

Для изучения плотности вещества за фронтом сталкивающихся волн в [1] получались импульсные рентгеновские снимки сжатых элементов среды. Таким образом состояние двухступенчатого сжатия были зафиксированы в диапазоне давлений от 500 до 900 кбар у парафина, воды, плексигласа, магния и алюминия. В настоящем сообщении описывается определение плотности ударносжатых непроводящих тел. Приводятся результаты измерения двукратной сжимаемости парафина, глины, а также кристаллов хлористого калия и хлористого натрия. В основе примененного способа лежит известный магнитоэлектрический метод регистрации массовых скоростей Е. К. Завойского [2].

1. **Схема эксперимента.** Для определения степени сжатия исследуемая среда помещается в постоянное магнитное поле и в нее вводится проводник, образующий почти замкнутый контур. Плоскость проводника устанавливается перпендикулярно магнитным силовым линиям. В процессе сжатия контура в нем индуцируется электродвижущая сила

$$E = -H \frac{dS}{dt} 10^{-8} \frac{с.м^2}{сек}, \quad H \frac{dS}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Здесь  $\Phi$  — магнитный поток.

Как следует из квадратуры уравнения (1.1), для произвольного момента  $t$  после начала сжатия площадь контура

$$S(t) = S_0 - \frac{1}{H} \int_0^t |E| dt \quad (1.2)$$

При этом средняя плотность вещества в контуре

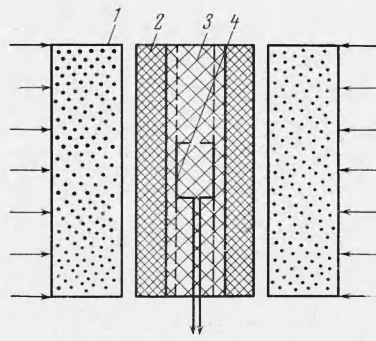
$$\rho_2 = \rho_0 \left[ 1 - \frac{J(t)}{S_0 H} \right]^{-1}, \quad J(t) = \int_0^t |E| dt \quad (1.3)$$

Здесь  $S_0$  и  $S$  — начальная площадь контура и в момент  $t$  соответственно,  $E$  — напряженность в  $э$ ,  $H$  — напряженность магнитного поля в  $э$ ,  $\rho_0$  — начальная плотность среды,  $\rho_2$  — плотность среды в сжатом состоянии.

Для получения конечных значений плотности  $\rho_2$  функция  $J(t)$ , определяемая площадью под амплитудной кривой осциллограммы, находится для момента завершения процесса сжатия, когда отраженные ударные волны выходят за пределы контура. На результаты измерений форма контура не влияет, и он может иметь произвольную конфигурацию. Существенно знать только его первоначальную площадь. Помимо плотности для получения необходимой информации о процессе сжатия должны быть также определены давления при столкновении. Наилучшим образом эта задача может быть решена при помощи манганиновых датчиков, вводимых в плоскость контура. Это решение позволило бы получить параметры процесса без обращения к кинематическим параметрам ударных волн, т. е. новым и вполне независимым способом.

Для определения давлений авторы использовали информацию об амплитуде падающих ударных волн.

На фиг. 1 представлена схема опыта по определению двукратной сжимаемости, на которой 1 — заряд ВВ; 2 — экран из парафина, 3 — образец из парафина, глины или соли, 4 — рамка магнитоэлектрического датчика. Для измерений применялись датчики в виде прямоугольных рамок, длинные стороны которых устанавливались параллельно фронтам падающих ударных волн. На фиг. 2 представлены  $x-t$ -диаграммы движения рамки при синхронном (а) и неодновременном (б) подходе ударных волн к датчику ( $abcd$  и  $a'b'c'd'$  — траектории движения датчиков,  $mbn$  и  $m'b'n$  — траектории падающих ударных волн,  $nc'k$  и  $nc'k'$  — траектории движения отраженных волн, 1 — экран, 2 — образец,  $S_0$  и  $S$  — начальная и конечная толщины образца). На фиг. 3 приведено схематическое изображение осциллограмм э.д.с. при синхронном (а) и несинхронном

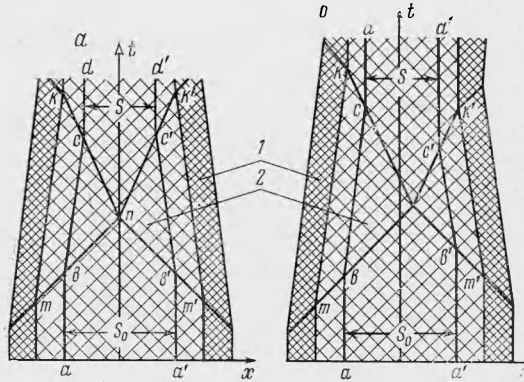


Фиг. 1

(б) подходе к датчику падающих ударных волн. В первом случае средняя массовая скорость движения сторон датчика под действием падающих волн пропорциональна половине выброса, во втором]

$$u_1 = (J_1 + 1/2 J_2 + J_3) (Ht)^{-1} \tag{1.4}$$

Функция  $J_2$  соответствует периоду совместного движения сторон датчика, функции  $J_1$  и  $J_3$  — раздельному движению его левой или правой стороны в начале и в конце процесса столкновения. Если за фронтом падающих волн их интенсивности снижаются, соответственно падают и скорости сближения противоположных перекладин рамки. В этих условиях за фронтами отраженных волн вещество приобретает небольшую отрицательную скорость расширения; схема осциллографической записи э.д.с. для волн не строго столбообразного профиля показана на фиг. 3, в. Результаты опытов для этой формы записи интерпретируются так же, как и для других вариантов — площадь осциллограммы определяет фактическое смещение сторон контура, а средняя величина выброса — эффективную амплитуду первой ударной волны. Давление отражения



Фиг. 2

находилось по уравнению сохранения количества движения

$$p_2 = p_1 + \rho_1 D_{12} u_1 \tag{1.5}$$

Здесь  $p_1$  — давление в падающей волне,  $\rho_1$  — плотность вещества в ней,  $u_1$  — средняя эффективная скорость вещества в первой ударной волне,  $D_{12}$  — скорость распространения отраженной ударной волны по отношению к веществу перед ее фронтом

$$D_{12} = u_1 \frac{\rho_2 / \rho_1}{\rho_2 / \rho_1 - 1} = \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} u_1 \tag{1.6}$$

Предполагается, что ударная адиабата однократного сжатия предварительно найдена в диапазоне давлений, включающем в себя давление падающей волны.

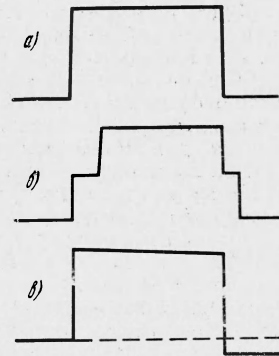
В этом случае значение  $u_1$  позволяет вычислить давление и плотность

$$p_1 = \rho_1 u_1 D_1, \quad \rho_1 = \rho_0 D_1 (D_1 - u_1)^{-1} \tag{1.7}$$

Редакция выполнения экспериментов схематически представлена на фиг. 1. Двукратное сжатие образцов производилось плоскими ударными волнами, полученными с помощью двух одновременно инициируемых зарядов взрывчатого вещества диаметром 90 мм и высотой 40 мм, расположенных один против другого. Образцы прикрывались экранами из парафина толщиной 10 мм и состояли из трех слоев. Толщина среднего слоя составляла 12 ÷ 18 мм, боковых — 3 ÷ 4 мм в разных опытах. Между слоями располагался, как показано на фиг. 1, магнитоэлектрический датчик, изготовливающийся из алюминиевой фольги толщиной 0.1 мм. Напряженность постоянного магнитного поля, проходящего через рамку, составляла ~450э и измерялась перед каждым опытом с погрешностью ~1%.

Представленные на фиг. 4 осциллограммы получены на образцах из парафина (а, б) и на образце из хлористого калия (в). Первый выброс луча соответствует приходу к рамке датчика ударных волн. Как указывалось ранее, небольшие уступы на середине фронта первого выброса характеризуют величину неодновременности подхода к рамке ударных волн с противоположных сторон.

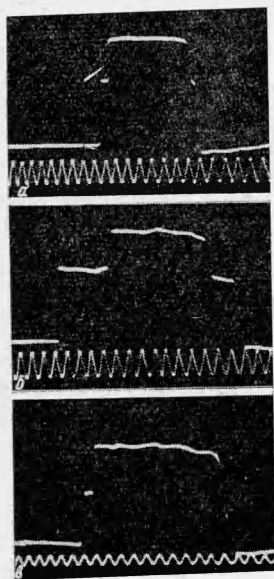
Столбообразная часть осциллограмм соответствует времени движения двух сторон рамки датчика вплоть до моментов прихода к ним отраженных волн, после чего последние останавливаются, и наводимая в рамке э.д.с. становится равной нулю. Этому моменту соответствует сброс луча на осциллограмме вниз к нулевой линии.



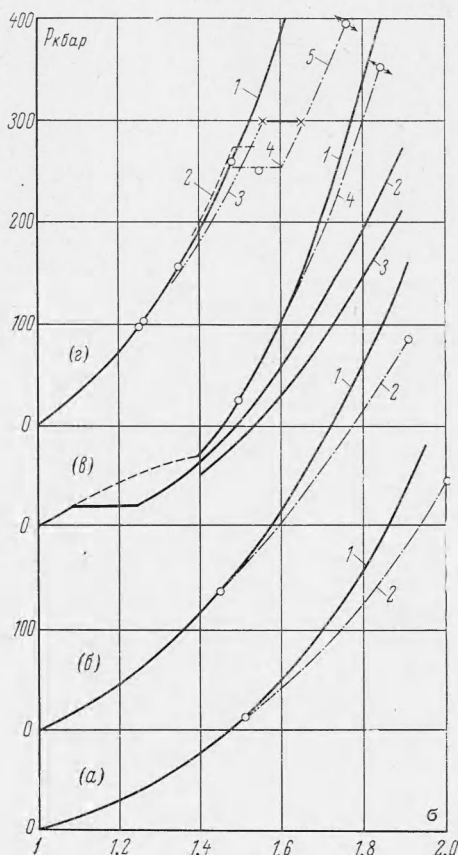
Фиг. 3

Уступ на середине заднего фронта импульса соответствует неодновременности прихода к рамке отраженных волн сжатия. Их неодновременность значительно меньше неодновременности подхода первых ударных волн, что объясняется сжатием рамки и существенно большей скоростью распространения отраженных ударных волн. Как показали эксперименты, проведенные в одинаковых условиях, несмотря на некоторые индивидуальные различия в ходе осциллографических кривых, интегральные характеристики процесса (общее смещение, средняя скорость) остаются в высшей мере стабильными.

2. Двукратная сжимаемость глины, парафина, хлористого калия и хлористого натрия. Определение давлений и плотностей за фронтом сталкивающихся волн было осуществлено для парафина, глины и монокристаллического хлористого калия и хлористого натрия. Для отыскания по массовым скоростям первых ударных



Фиг. 4



Фиг. 5

волн их остальных параметров были использованы сведения о сжимаемости этих веществ, приводимые в [1,3,4]. Для расчетов были использованы следующие взятые из этих источников соотношения:  $D = 3.30 + 1.31 u$  для парафина,  $D = 2.78 + 1.21 u$  для так называемой «белой» глины,  $D = 3.40 + 1.35 u$  для NaCl и  $D = 2.05 + 1.62 u$  для второй фазы KCl.

Полученные экспериментальные данные обобщены в таблице для случая, когда массовая скорость парафинового экрана  $u = 2.03$  км/сек.

В таблице приведены по порядку для исследованных материалов — KCl<sub>100</sub>, NaCl<sub>100</sub> «белой» глины (A) влажностью ~4% и парафина (B) — начальная плотность образцов  $\rho_0$  г/см<sup>3</sup>, параметры сжатия образцов первыми ударными волнами (волновая  $D_1$  и массовая  $u_1$  скорости в км/сек, давление ударного сжатия  $p_1$  кбар, плотность вещества за фронтом первой ударной волны  $\rho_1$  г/см<sup>3</sup>), параметры сжатия образцов отраженными ударными волнами (скорость распространения отраженных ударных волн относительно движущегося материала  $D_{12}$  км/сек, давление двукратного сжатия  $p_2$  кбар, конечная плотность  $\rho_2$  г/см<sup>3</sup>). Данные, приведенные в таблице, сопоставлены на фиг. 5 с ударными адиабатами однократного сжатия [1-4] и данными Дрикамера [5] и Бассетта [6] по статическому сжатию KCl и NaCl. На фиг. 5,а приведена зависимость  $p$ - $\sigma$  для парафина (1 — адиабата однократного сжатия, 2 — вероятное положение адиабаты двукратного сжатия). На фиг. 5,б приведена зависимость  $p$ - $\sigma$  для глины (1 — адиабата однократного сжатия [3], 2 — вероятное положение адиабаты двукратного сжатия).

Исследованный материал	$\rho_0$	$D_1$	$u_1$	$p_1$	$\rho_1$	$D_{12}$	$p_2$	$\rho_2$
KCl	1.99	4.36	1.44	125	2.97	7.70	454	3.66
		4.71	0.96	97.5	2.71	6.36	263	3.20
NaCl	2.16	4.77	1.00	103.2	2.76	5.45	252	3.35
		5.26	1.37	155.7	2.92	5.97	395.7	3.81
A	2.13	4.49	1.42	137.5	3.12	5.68	387	4.10
B	0.9	5.96	2.03	109	1.37	8.43	344	1.81

На фиг. 5, *а* приведена зависимость  $p$ - $\sigma$  для KCl (*1* — ударная адиабата однократного сжатия [4], *2* — изотерма для 20° С из [5], *3* — изотерма для 0° К из [4], *4* — вероятное положение адиабаты двукратного сжатия).

На фиг. 5, *б* приведена зависимость  $p$ - $\sigma$  для NaCl (*1* — адиабата однократного сжатия из [4] и [8], *2* — данные по ударному сжатию Марша, Маккуина и др., *3* — изотерма для 20° С из [5], *4* — данные по статическому сжатию из [6], *5* — результаты измерений двукратной сжимаемости). Результаты измерений двукратной сжимаемости парафина, глины и KCl хорошо согласуются с положением адиабат однократного сжатия — экспериментальные точки, как следует из теории вопроса, смещены от них вправо, в сторону больших плотностей.

Положение точек у NaCl, сжатого в направлении оси (100), убедительно свидетельствует об осуществлении у NaCl при давлениях  $\sim 270$  кбар полиморфного превращения, по-видимому, в структуру типа CsCl. Полученные результаты подтверждают данные Бассетта [6], зарегистрировавшего фазовый переход в NaCl при близких давлениях.

Выявление полиморфного превращения в NaCl в условиях двукратного ударного сжатия авторы объясняют увеличением сдвиговых деформаций, так как при однократном ударном сжатии NaCl регистрировались лишь начальные стадии превращения [2,7]. И злом в ходе адиабаты NaCl при  $\sim 1.5$  Мбар, отмеченный в [9], связан, по-видимому, с плавлением.

Поступила 12 I 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

- Альтшулер Л. В., Петрунин А. П. Рентгенографическое исследование сжимаемости легких веществ при косом столкновении ударных волн. Ж. техн. физ., 1961, т. 31, вып. 6.
- Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, вып. 2.
- Альтшулер Л. В., Павловский М. Н. Исследования глины и глинистого сланца при сильных динамических воздействиях. ПМТФ, 1971, № 1.
- Альтшулер Л. В., Павловский М. Н., Кулешова Л. В., Симмаков Г. В. Исследование галогенидов щелочных металлов при высоких давлениях и температурах ударного сжатия. Физика твердого тела, 1963, т. 5, вып. 1.
- Peretz-Albuerne E. A., Drickamer H. G., Effect of High pressures on the compressibilities of seven crystals having the NaCl or CsCl structure. J. Chem. Phys., 1965, vol. 43, No. 4, p. 1381.
- Bassett W. A., Takahashi T., Ho-Kwang Mao, Weaver J. S. Pressure-induced phase transformation in NaCl. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 1, p. 319.
- Альтшулер Л. В., Бражник М. И., Герман В. Н., Миркин Л. И. Взрывная деформация монокристаллов. Физика твердого тела, 1967, т. 9, вып. 11.
- Альтшулер Л. В., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Динамическая сжимаемость, уравнение состояния и электропроводность хлористого натрия при высоких давлениях. ЖЭТФ, 1960, т. 39, вып. 1, стр. 16.
- Кормер С. Б., Сеницин М. В., Фунтиков А. И., Урлин В. Д., Блинов А. В. Исследование сжимаемости пяти ионных соединений до давлений 5 Мбар. ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 4, стр. 1202.